

Rejeitos Compactados de Minério de Ferro: Avaliação de Performance Através dos Resultados de Investigação CPTu e Ensaios Triaxiais

Jean Carlos Macson

Engenheiro Geotécnico, Conselheiro Lafaiete, Brasil, jean.carlo.cardoso@vale.com

Geydson Alves

Engenheiro Geotécnico, Belo Horizonte, Brasil, geydson.alves@vale.com

Lincoln Barony

Engenheiro Geotécnico, Congonhas, Brasil, lincolnbarony@gmail.com

Izabela Cavalieri

Geólogo, Conselheiro Lafaiete, Brazil, izabela.lopes@vale.com

RESUMO: A prática de empilhamento de rejeitos desempenha um papel crítico na gestão de resíduos sólidos em diversos setores, incluindo mineração, construção e indústrias relacionadas. Nesse contexto, a pesquisa em questão empreende uma investigação abrangente e multifacetada, com o objetivo de aprimorar a compreensão e o controle tecnológico em uma estrutura geotécnica. O estudo adota uma abordagem multidisciplinar, utilizando ensaios Piezocone (CPTu), procedimentos de controle de compactação e ensaios triaxiais para coletar dados geotécnicos detalhados. Essa abordagem investigativa visa caracterizar as propriedades físicas e mecânicas dos rejeitos empilhados, abrangendo aspectos como resistência, densidade, compressibilidade e comportamento sob carga. Os resultados desta pesquisa têm implicações significativas, fornecendo insights essenciais para otimizar as práticas de empilhamento de rejeitos, minimizar riscos ambientais e maximizar a eficiência operacional. Além disso, contribuirá para o desenvolvimento de diretrizes e estratégias de gestão de resíduos sólidos mais robustas e alinhadas com princípios de sustentabilidade e responsabilidade ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos, Geotecnia, Resistência, Empilhamento Filtrado.

ABSTRACT: The practice of tailings stacking plays a critical role in solid waste management in a variety of sectors, including mining, construction, and related industries. In this context, the research in question undertakes a comprehensive and multifaceted investigation, with the aim of improving the understanding and control of this complex operation. The study adopts a multidisciplinary approach, using Piezocone (CPTu), Compaction control procedures and triaxial tests to collect detailed geotechnical data. This investigative approach aims to thoroughly characterize the physical and mechanical properties of stacked tailings, covering aspects such as strength, density, compressibility and behavior under load. In addition to a rigorous analysis of geotechnical properties, the research seeks to understand the complex interactions between stacked materials, environmental conditions and the structure of the tailings piles. The study also considers the potential impact of these factors on the stability, safety, and sustainability of tailings piles. The results of this research have significant implications, providing essential insights for optimizing tailings stacking practices, minimizing environmental risks, and maximizing operational efficiency. In addition, it will contribute to the development of more robust solid waste management guidelines and strategies and aligned with principles of sustainability and environmental responsibility.

KEYWORDS: Tailings, Geotechnics, Resistance, Filtered Stacking.

1 INTRODUÇÃO

A prática de empilhamento de rejeitos desempenha um papel crítico na gestão de resíduos sólidos em diversos setores, incluindo mineração, construção e indústrias relacionadas. Nesse contexto, a pesquisa em questão empreende uma investigação abrangente e multifacetada, com o objetivo de aprimorar a compreensão e o controle dessa complexa operação em uma estrutura geotécnica. O estudo adota uma abordagem multidisciplinar, utilizando ensaios Piezocone (CPTu), procedimentos de controle de compactação e ensaios triaxiais para determinar dados geotécnicos detalhados em um empilhamento de rejeitos. Esta pesquisa abordará a avaliação da performance de rejeitos compactados, apresentando a caracterização dos rejeitos e avaliando a eficácia da compactação por meio de ensaios de compactação, triaxiais e CPTu.

De acordo com Schnaid e Odebrecht (2014), os testes de cone e piezocone, conhecidos como CPT e CPTu, respectivamente, são ferramentas relevantes na investigação geotécnica de campo. Esses testes fornecem informações essenciais para determinar a estratigrafia do solo, identificar propriedades dos materiais investigados, e prever a capacidade de carga das fundações.

Ainda conforme Schnaid e Odebrecht (2014), no Brasil, o teste de cone começou a ser utilizado desde o final dos anos 1950, principalmente em projetos de plataformas marítimas para exploração de petróleo. No entanto, sua aplicação era limitada até a década de 1990, quando houve um aumento significativo no interesse comercial por esse teste. Desde então, tem havido um crescente número de pesquisas, desenvolvimentos e relatos de casos que refletem a prática brasileira. Atualmente, o teste é conduzido comercialmente por várias empresas estabelecidas no Brasil e na América do Sul.

Braja (2007) ressalta que o ensaio de compressão triaxial é um dos mais confiáveis métodos disponíveis para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento onde os testes podem ser realizados com adensamento e controle de drenagem.

A avaliação de performance através dos resultados de investigação CPTu e ensaios triaxiais visa caracterizar as propriedades físicas e mecânicas dos rejeitos empilhados, abrangendo aspectos como resistência, densidade, compressibilidade e comportamento sob carga. Além de uma análise das propriedades geotécnicas, a pesquisa busca compreender as interações complexas entre os materiais empilhados, as condições ambientais e a estrutura das pilhas de rejeitos. O estudo também considera o impacto potencial desses fatores na estabilidade, segurança e sustentabilidade das pilhas de rejeitos. Os resultados desta pesquisa têm implicações significativas, fornecendo informações essenciais para otimizar as práticas de empilhamento de rejeitos, minimizar riscos ambientais e maximizar a eficiência operacional. Além disso, contribuirá para o desenvolvimento de diretrizes e estratégias de gestão de resíduos sólidos mais robustas e alinhadas com princípios de sustentabilidade e responsabilidade ambiental. Com isso, a introdução visa situar o leitor no contexto amplo e complexo do estudo, destacando sua relevância e potenciais contribuições para o avanço da área.

2 METODOLOGIA

O presente item contempla a descrição dos materiais utilizados na pesquisa, procedimentos adotados para execução dos ensaios de campo e laboratoriais.

2.1 Materiais

O estudo foi realizado no estado de Minas Gerais, no quadrilátero ferrífero, utilizando empilhamento de rejeito filtrado para demonstrar a performance do material compactado. Foram utilizados ensaios de projeto para determinação dos critérios para operação, ensaios de caracterização, granulometria, ensaio de compactação *in situ*, triaxial realizado em amostras indeformadas e ensaios CPTu. Foram executados ensaios de caracterização completa, ensaios de permeabilidade e ensaios triaxiais tipo CIU (consolidado não-drenado) e CID (consolidado drenado) em amostras oriundas do processo de desaguamento e amostragem. Os rejeitos ensaiados apresentaram características granulométricas de areia siltosa com pouca porcentagem de argila (<

2%) e material passante a peneira N° 200 de 12% a 22%; Os resultados dos ensaios de Limites de Atterberg apresentam a característica não plástica de todos os materiais, confirmando resultados de granulometria descritos previamente. Todos os materiais têm características granulares e possuem baixas frações finas. A Tabela 1 apresenta um resumo dos ensaios de caracterização realizados. Estes critérios foram fundamentais para orientar os procedimentos de compactação e avaliar a eficiência do processo.

Tabela 1 Caracterização dos rejeitos.

Densidade dos Grãos (g/cm ³)	W _{ot} (%)	M. específica seca máxima (g/cm ³)	E _{max}	E _{min}	Limites de Atteberg	K (cm/s)
3,258	11,1	1,804	1,163	0,718	NL/NP	2,90E-03

A metodologia adotada neste estudo foi delineada para investigar a performance dos rejeitos compactados de minério de ferro, com foco na avaliação detalhada de suas propriedades físicas, mecânicas e geotécnicas. Inicialmente, procedeu-se com a caracterização dos rejeitos, incluindo a análise da granulometria, teor de umidade, presença de materiais finos e densidade, por meio de ensaios laboratoriais.

Para avaliar a eficácia do processo de compactação, foram realizados ensaios de compactação utilizando o método Proctor modificado, permitindo a determinação da densidade máxima seca e umidade ótima dos rejeitos compactados. Esses ensaios foram conduzidos em diferentes condições de compactação para representar variações nas práticas operacionais.

Além disso, foram realizados ensaios triaxiais para avaliar as propriedades mecânicas dos rejeitos compactados contemplando ensaios com Grau de compactação (GC) de 85% (Figura 1) e 98% (Figura 2), incluindo resistência ao cisalhamento, deformabilidade e comportamento sob diferentes níveis de tensão, durante a operação de empilhamento dos rejeitos foram coletadas amostras indeformadas para realização de novos ensaios triaxiais para verificação quanto ao comportamento do solo compactado. Esses ensaios foram conduzidos de acordo com as normas e procedimentos estabelecidos para garantir resultados confiáveis e comparáveis.

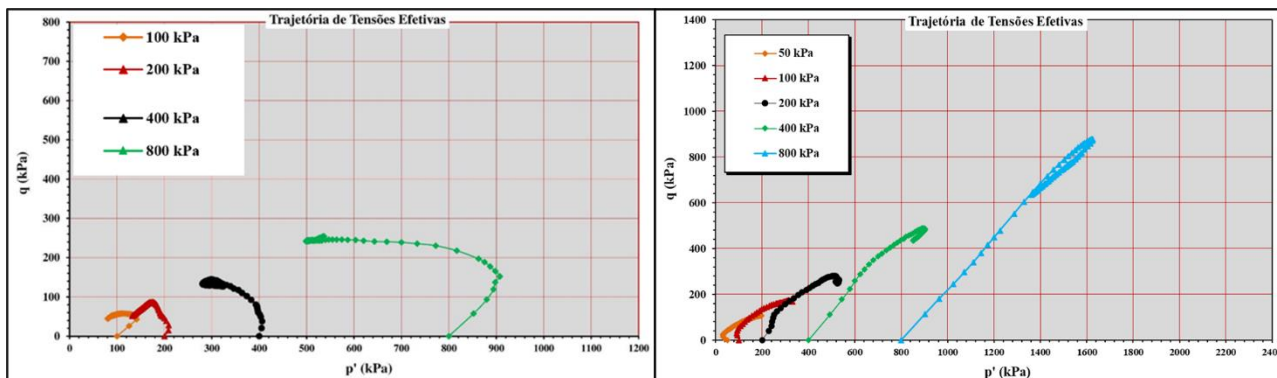


Figura 1. Triaxial CIU_{sat} – a) GC 85%; b) GC 98%

Com base nos ensaios é possível classificar o comportamento do material em função do grau de compactação, essa interpretação é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Comportamento dos Rejeitos.

Amostra	CIU _{sat} GC=85%	CIU _{sat} GC=98%
Rejeitos	Contrátil	Dilatante

Foram utilizados ensaios do tipo CPTu, que permitem a determinação da resistência ao cisalhamento, capacidade de suporte e compressibilidade do solo. O principal foco na análise do resultado dos ensaios CPTu é a classificação quanto a resposta do material ao carregamento (contratil ou dilatante) em comparação ao demais ensaios e projeto.

A análise dos resultados dos ensaios foi realizada de forma integrada, considerando as propriedades físicas, mecânicas e geotécnicas dos rejeitos compactados. Essa abordagem multidisciplinar permitiu uma compreensão abrangente da performance dos rejeitos empilhados, incluindo sua estabilidade, segurança e sustentabilidade em diferentes condições operacionais e ambientais.

Em suma, a metodologia adotada neste estudo proporcionou uma avaliação abrangente e detalhada dos rejeitos compactados de minério de ferro, fornecendo informações cruciais para otimizar as práticas de empilhamento, minimizar os impactos ambientais e promover uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos sólidos na indústria mineradora.

3 CRITÉRIOS DE PROJETO

Com base nos resultados dos ensaios e na operação assistida em aterro teste, os critérios de projeto para a compactação dos rejeitos de minério de ferro foram robustamente estabelecidos. Considerando a necessidade de garantir uma estrutura estável e segura, os seguintes critérios foram definidos:

- **Espessura das Camadas:** As camadas de rejeitos devem ser compactadas com uma espessura de 70 cm. Esta espessura foi determinada com base na capacidade de compactação dos equipamentos disponíveis e na consideração da eficácia da compactação em profundidades controladas.
- **Grau de Compactação Mínimo:** Após a compactação, cada camada de rejeitos deverá atingir um Grau de Compactação (GC) mínimo de 98%, refletindo a necessidade de alcançar uma densidade adequada para garantir que o material apresente dilatância e resistência dos rejeitos empilhados. Ensaios devem ser realizados no topo, meio e base de cada camada.
- **Controle da Umidade:** Devido à grande capacidade de drenagem dos rejeitos e curva de compactação horizontalizada, a umidade não é considerada um critério para reprovação das camadas. No entanto, é essencial controlar a umidade junto ao Grau de Compactação em todas as camadas.

Esses critérios de projeto foram cuidadosamente desenvolvidos com base em uma análise abrangente dos resultados dos ensaios e em considerações práticas observadas durante a operação assistida em aterro teste. Eles visam garantir não apenas a conformidade com os padrões de qualidade e segurança, mas também a maximização da eficiência operacional e a minimização dos riscos ambientais associados ao empilhamento de rejeitos de minério de ferro.

4 ENSAIOS PARA CONTROLE DE COMPACTAÇÃO

Segundo FREIRE (2018), o controle de compactação em campo é essencial para obras de estruturas geotécnicas para garantir que o solo atinja o grau de compactação necessário. Durante o processo de compactação, é possível realizar esse controle para determinar o peso específico aparente seco e a umidade do solo, informações cruciais para calcular o grau de compactação (GC) e o desvio de umidade na camada compactada. Após a conclusão do processo de compactação em campo, deve-se comparar os resultados obtidos com aqueles dos ensaios realizados em laboratório para verificação do atendimento aos critérios de projeto.

4.1 Ensaio Proctor

O ensaio de compactação de Proctor é um procedimento padrão amplamente utilizado na engenharia geotécnica para determinar a densidade máxima seca e a umidade ótima de um solo. Esse ensaio é fundamental para avaliar a capacidade de compactação do solo e para projetar aterros, estradas e outras estruturas civis.

No ensaio de Proctor, uma amostra representativa do solo é compactada em um cilindro metálico em camadas sucessivas, utilizando um soquete padronizado. Cada camada é submetida a um número específico de golpes de compactação, geralmente 25 golpes para o Proctor normal e 56 golpes para o Proctor modificado. Após a compactação, a amostra é pesada e sua umidade é determinada. Os resultados do ensaio são utilizados para traçar uma curva de compactação, que relaciona a umidade do solo com sua densidade seca. Esta curva mostra como a densidade do solo varia com a umidade durante o processo de compactação. A partir dessa curva, é possível identificar dois parâmetros importantes:

A umidade ótima que é o teor de umidade que resulta na máxima densidade seca do solo. Esse ponto representa as condições ideais de umidade para a compactação do solo; e a densidade máxima seca: é a densidade do solo compactado na umidade ótima. Esse valor representa a máxima densidade que o solo pode atingir sob as condições de compactação especificadas. Com base nos resultados do ensaio Proctor, é possível selecionar as condições ideais de compactação para garantir a estabilidade e resistência necessárias das estruturas construídas sobre o solo.

4.2 Ensaio Triaxial

O ensaio triaxial CIU (Adensamento isotrópico e ruptura não drenada) é um teste de laboratório utilizado na geotecnia para avaliar as propriedades mecânicas de solos coesivos. Ele simula as condições de carga em profundidade, como as encontradas em fundações, barragens e taludes.

Durante o ensaio, uma amostra de solo é preparada em um cilindro de amostra e saturada com água para simular as condições de campo. Em seguida, a amostra é confinada lateralmente com uma pressão controlada e submetida a uma carga axial também controlada. Importante ressaltar que a drenagem é bloqueada, o que significa que a água não é permitida escapar da amostra durante o carregamento, simulando condições de drenagem restrita encontradas em situações reais.

Além da resistência ao cisalhamento, o ensaio triaxial CIU também permite a determinação da dilatação ou contração do solo. A dilatação ocorre quando o solo se expande lateralmente durante o carregamento, enquanto a contração ocorre quando o solo se contrai lateralmente. Esses comportamentos são observados e analisados durante o ensaio, assim observamos o comportamento do solo em diferentes condições de carga.

4.3 Ensaio de Penetração de Cone com Medição de Poropressão (CPTu)

O ensaio de CPTu é uma técnica geotécnica amplamente utilizada para investigar as propriedades do solo em profundidades subsuperficiais. Consiste na penetração de um cone metálico no solo por meio de um equipamento de sondagem, enquanto são registradas diversas medidas, incluindo a resistência à penetração do cone (q_t), a fricção lateral (f_s), e a pressão de poros (u_2).

Durante o ensaio, o cone é empurrado para o solo a uma taxa constante de 2 cm/s, e as medidas são registradas continuamente à medida que o cone penetra. A resistência à penetração do cone (q_t) é uma medida da resistência do solo à penetração e é obtida a partir da força necessária para empurrar o cone para o solo. A resistência à ponta (q_t) é uma medida da resistência encontrada na ponta do cone. A fricção lateral (f_s) é a resistência ao longo do fuste do cone. A pressão de poros (u_2) é a pressão da água nos poros do solo durante a penetração do cone.

Um estudo relevante é o de Robertson (2016), que investigou as correlações entre os parâmetros de estado do solo e os resultados do ensaio de CPTu. Essas correlações são importantes para interpretar os dados do ensaio e estimar as propriedades do solo em locais onde os ensaios de laboratório não são viáveis. Uma das principais aplicações do parâmetro de estado é na interpretação de resultados de ensaios de campo, como o CPTu, onde é possível correlacionar os parâmetros de estado com os resultados do ensaio para estimar as propriedades do solo, como a resistência ao cisalhamento não drenada, a permeabilidade, e a capacidade de carga.

5 RESULTADOS

5.1 Ensaio Proctor

A Figura 3 apresenta o resultado dos ensaios de controle de compactação realizados durante a operação de empilhamento de rejeito.

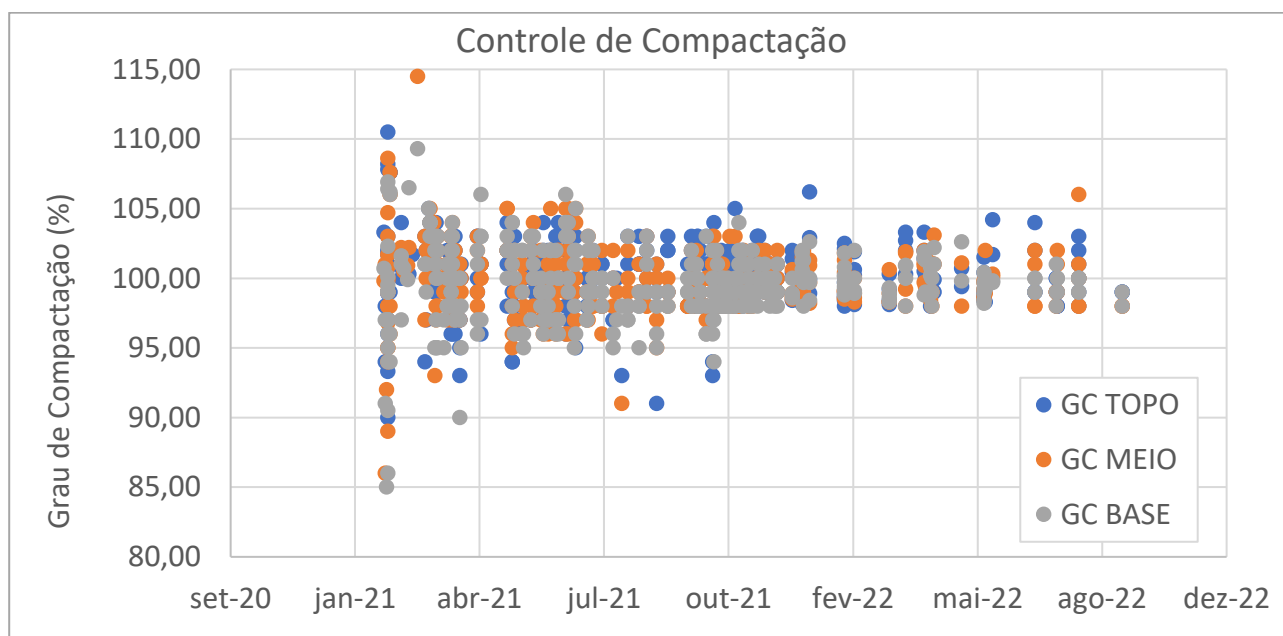


Figura 3 – Grau de compactação nas camadas de rejeito.

Como pode ser observado os menores valores de GC atingidos ocorreram entre fevereiro e outubro de 21, importante destacar que em fevereiro foram ensaiadas 03 (três) camadas com GC muito próximos de 85% na base e meio da camada compactada, conforme os critérios de projeto e ensaios triaxiais com este GC o rejeito passa a apresentar resposta contráctil no cisalhamento, os demais ensaios estão superiores e tendem a apresentar dilatância no cisalhamento.

5.2 Ensaio Triaxial

A Figura 4 apresenta ensaio CIU de amostra indeformada coletada no aterro da pilha, demonstrando que para o carregamento não drenado a compactação possibilitou a resposta dilatante do rejeito, foi incluída a envoltória de ruptura onde fica evidente a proximidade dos parâmetros de resistência de projeto.

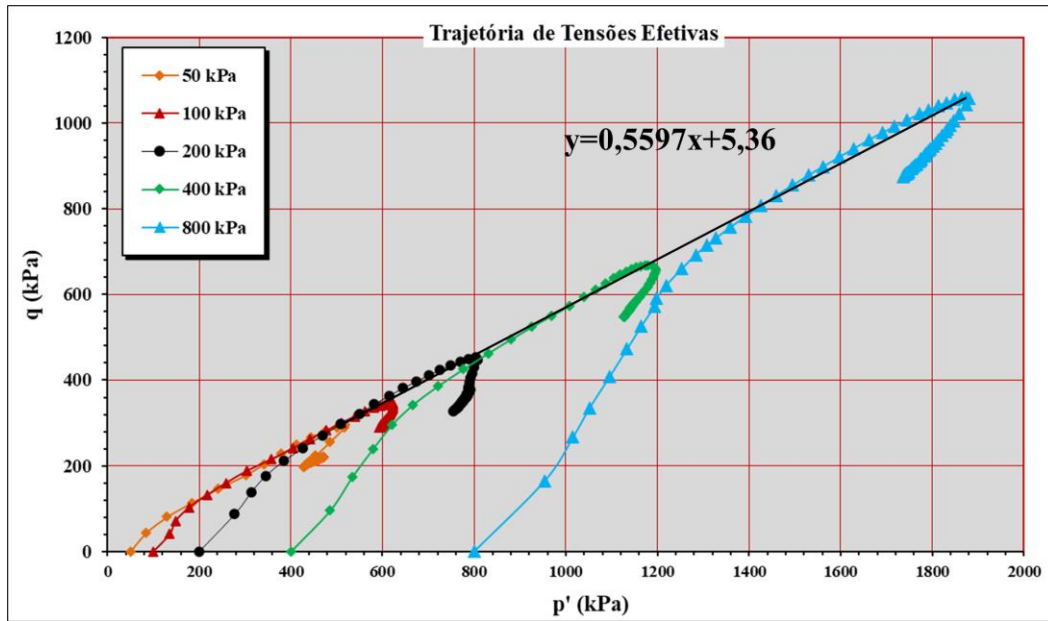


Figura 4. Triaxial CIU_{sat} – Amostra indeformada – Confinantes 50, 100, 200, 400 e 800kPa.

5.3 Ensaio de Penetração de Cone com Medição de Poropressão (CPTu)

Conforme Robertson (2016), a Figura 5 apresenta o ábaco SBTn (*Normalized soil behavior type*), em que a classificação é baseada no comportamento dos materiais. Esse ábaco se baseia em parâmetros normalizados obtidos a partir de ensaios CPTu, sendo eles a resistência de ponta normalizada (Q_{tn}) e a razão de atrito lateral normalizado (F_r). Através deste sistema é possível definir o tipo de material e seu comportamento, para Pilha de Rejeito em análise fica evidente que o rejeito possui comportamento predominantemente arenoso-dilatante (SD), o que demonstra a importância em manter a operação garantindo o grau de compactação (GC) maior ou igual à 98%. Também é observado a predominância da dilatância quando avaliado o comportamento do rejeito pelo parâmetro de estado, sendo um parâmetro regulador no entendimento constitutivo moderno do solo. A Figura 6 apresenta os gráficos de resistência, poropressão e razão de atrito.

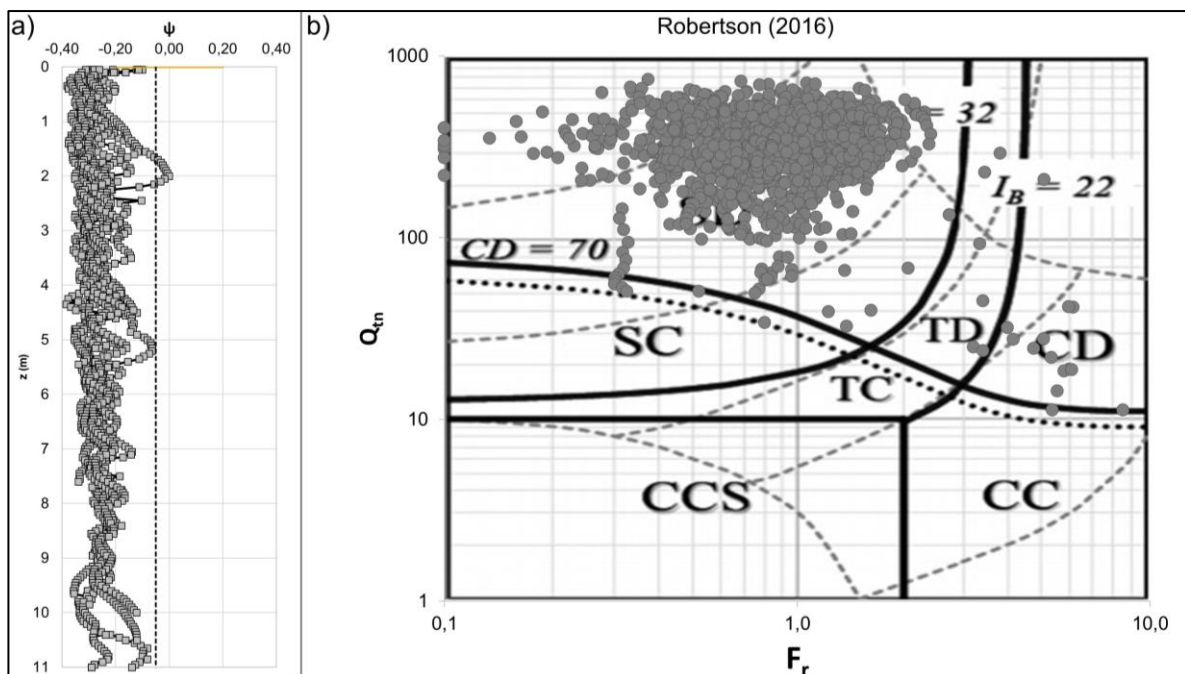


Figura 5. a) Parâmetro de estado; b) Ábaco SBTn.

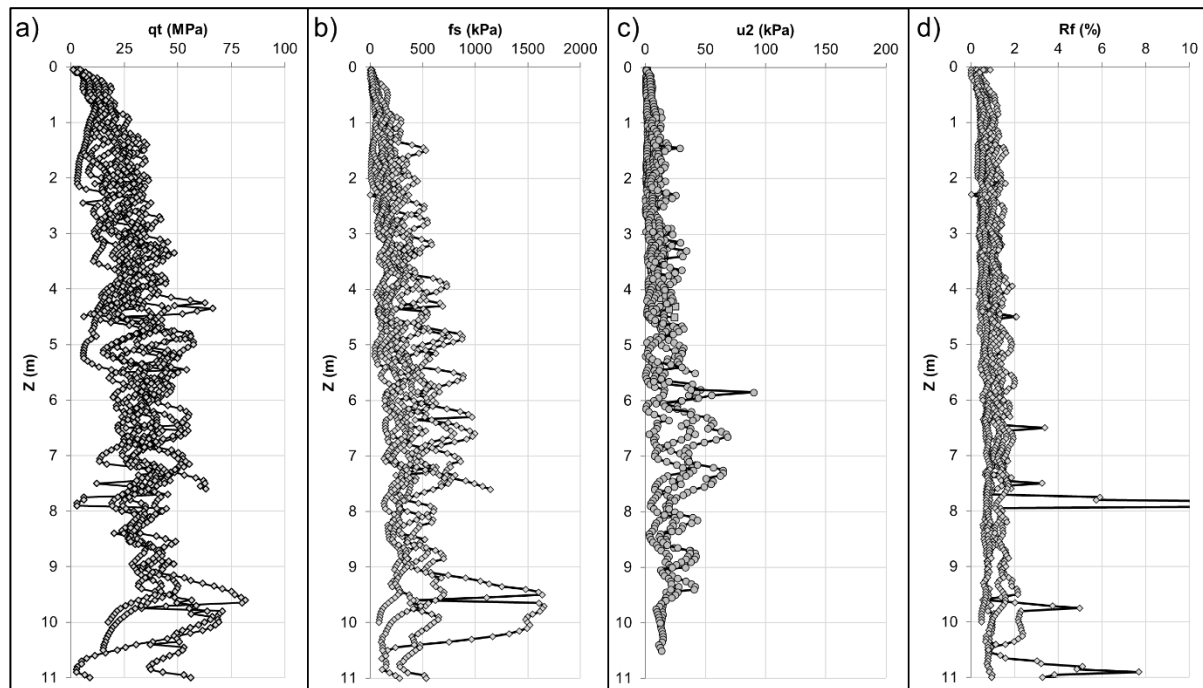


Figura 6. Resultado ensaios CPTu: a) Resistência de ponta (qt); b) Atrito Lateral; c) Poropressão; d) Razão de atrito.

6 CONCLUSÕES

Como conclusão deste estudo, é crucial ressaltar a importância de uma abordagem integrada na avaliação dos resultados obtidos por meio de ensaios de campo e ensaios laboratoriais. A análise conjunta desses dados é fundamental para uma conclusão precisa sobre as propriedades e comportamento do rejeito. Além disso, a observação cuidadosa e o controle do tipo de material incorporado na estrutura se mostraram aspectos essenciais. Essa prática possibilitou observar respostas em conformidade com o projeto, evidenciando a relevância do controle adequado dos materiais utilizados na construção de estruturas geotécnicas.

Os resultados obtidos nos ensaios CPTu e triaxial corroboraram as observações feitas durante o controle de compactação. Confirmamos que o solo apresenta comportamento dilatante e boa resistência, conforme evidenciado nos ensaios de campo e laboratoriais. Nesse sentido, é essencial que os engenheiros geotécnicos considerem todas as informações disponíveis, tanto dos ensaios de campo quanto dos ensaios laboratoriais, para tomar decisões fundamentadas e garantir a segurança e estabilidade das estruturas geotécnicas.

7 REFERÊNCIAS

Braja M. D. Fundamentos de Engenharia Geotécnica; Tradução all Tasks; revisão técnica Pérsio Leister de Almeida Barros. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

COMPACTAÇÃO DOS SOLOS - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Curva-de-compactacao_fig1_313703122 [accessed 21 Mar, 2024]

Proctor, R.R. (1933). Fundamentals Principles of Soil Compaction. Engineering News Record, New York, 3(9) pp. 245-248; 3(10) pp. 268-289; 3(11) pp. 348-351; and 3(12) pp. 372-376

Robertson, P. K. (2016). Soil Behavior Type from the CPT: An Update. Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'14), Las Vegas, USA.